

УДК 621.9.047

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОМБИНИРОВАННОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Д.М. Небольсин, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов (ВГТУ)

Подземное буровое оборудование работает при комплексном воздействии нестабильных динамических нагрузок, агрессивной газожидкостной среды, содержащей соединения водорода, также на проточных поверхностях в местах концентрации загрязнений откладываются парафины, газовый конденсат и песок. В такой агрессивной среде наибольшим воздействиям подвержены детали проточной части (корпуса, стволы, переводники). От надежности и долговечности деталей подземного нефтегазового оборудования зависит работа мобильного комплекса в целом, так как при выходе оборудования из строя наносится непоправимый ущерб транспортной технике, экологии, теряются огромные денежные средства.

Одним из препятствий в достижении и поддержании в процессе эксплуатации заданных показателей качества является присутствие технологически наследованного трещиноватого слоя внутренних поверхностей длиномерных деталей. Решить проблему повышения ресурса оказалось возможным при использовании комбинированной обработки, сочетающей воздействия различного рода: механическое и химическое, возникающее в процессе действия электрического поля в среде слабопроводящей газожидкостной среды и металлических гранул.

Механизм комбинированного воздействия представляет собой комбинацию двух процессов, происходящих одновременно: механического воздействия гранул на внутреннюю прерывистую поверхность и анодного растворения при низких напряжениях, исключаяющих короткие замыкания между гранулами и обрабатываемым материалом. Анодный процесс растворения микронеровностей происходит под действием тока в слабопроводящей жидкой пленке технической воды, подаваемой в зону обработки в распыленном до капельной фракции виде одновременно с микрогранулами.

Окисные пленки на микрогранулах и на заготовке утоняются и разрушаются, при этом достигается плотность тока, необходимая для анодного растворения поверхностного слоя материала заготовки. Разреженная капельная фрак-

ция жидкостной составляющей практически не мешает микрогранулам получать от напора сжатого воздуха кинетическую энергию, достаточную для деформирования и осадки микровыступов и подается в зону обработки отдельно от микрогранул.

Чтобы единичного контакта (или серии контактов) было достаточно для выравнивания микрогеометрии за счет механического воздействия и анодного растворения осуществляется управление энергией соударений. Так как микрогранулы подают в зону обработки струйным методом, то и параметры процесса изменяют регулированием кинетической энергии потока, варьируя расход и давление сжатого воздуха. Конкретную концентрацию капельной фракции устанавливают экспериментально на настроечном имитаторе, исходя из обеспечения постоянной жидкостной пленки.

При моделировании процесса принимаются исходные данные: физико-механические свойства материала микрогранул и детали; радиус кривизны (диаметр) обрабатываемого отверстия; исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей. Граничными условиями являются: предельно достижимые значения наклепа или высоты неровностей после обработки в условиях экранирования среды; предельные значения давления в потоке обрабатываемой среды, определяемые расходом сжатого воздуха и концентрацией микрогранул. Основным показателем импульсного механического воздействия на поверхность является скорость ее деформации.

Параметром регулирования является, таким образом, давление сжатого воздуха, определяющее расход обрабатываемой среды и, следовательно, скорость деформирования микровыступов обрабатываемой поверхности. Вопрос остается в достоверном определении скорости деформирования поверхности от микрошарика наших условиях. Для этого надо представить комбинированное движение на срезе сопла и его кинетическую энергию.

Учитывая при определении скорости смеси микрошариков, воздуха или жидкости известные законы гидродинамики скорость истечения газожидкостной смеси через сопла под давлением можно представить в следующем виде.

При твёрдых сферических частицах радиусом описанной окружности  $R$ , падающих на поверхность детали со средней скоростью  $V_{cp}$ , средняя скорость ее деформации составляет  $V/R$ .

Средняя скорость потока гранул с газожидкостной средой

$$V_{cp} = k_{жс} k_{мкии} Q / F_c \times 3600, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/ч;  $F_c$  – площадь поперечного сечения отверстия сопла, м<sup>2</sup>;  $k_{жс}$  – коэффициент, учитывающий влияние подмешиваемой в поток на выходе из сопла жидкости ( $k_{жс} = 0,95 \dots 0,97$ );  $k_{мкии}$  – коэффициент, экспериментально учитывающий влияние расхода микрошариков через дозатор ( $k_{мкии} = 0,7 \dots 0,85$ ) на скорость потока обрабатывающей среды.

Из ранних трудов известно что при этом шарик должен достичь необходимой кинетической энергии  $K$  не менее как для обеспечения деформации порядка  $8 \times 10^4$  мм в секунду. Проследим движение сферической частицы, падающей на поверхность по нормали. Уравнение движения в процессе контактирования:

$$\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \frac{dV}{dt} = -\pi R_a^2 \bar{P}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус частицы,  $R_a$  – радиус вмятины,  $\rho$  – плотность материала детали,  $\bar{P}$  – средняя нагрузка в зоне контакта. Полная пластичность наступает при значениях  $\bar{P} = 3\sigma_T$ .

Среднее давление  $P$ , оказывающее сопротивление движению, при соотношении  $E/\sigma_T R$  – беспараметрного параметра деформации  $E/\sigma_T R \leq 36$ , обеспечивает получение вмятины размером  $0,004R$  для сталей, где отношение модуля текучести к модулю упругости  $\sigma_T/E = 0,0024$ . Что установлено экспериментально. С учетом 2 после интегрирования и  $\bar{P} = 3\sigma_T$

$$1/\Omega = \left\{ \left( 0,2 + \frac{2}{9} \ln E/\sigma_T \right) + \frac{1}{9} \left[ \ln(2\bar{Z}/R) - \frac{4\bar{Z}}{R} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $\Omega$  – коэффициент, учитывающий степень предварительной деформации поверхности,  $\bar{Z}_{np}$ . Это уравнение описывает начальную стадию деформирования, как только величина давления возрастет до  $3\sigma_T$ , для дальнейших расчетов следует пользоваться эмпирическими зависимостями для более многогранных условий.

У микрошарика 300-100 мм есть в этом смысле ограничения, к тому же ему необходимо присутствие жидкости от перегрева поверхности и удаления

продуктов работы. Уравнение движения микрошариков с учетом экспериментальных исследований

$$K = MV^2/2 - F_{cv} - F_{mp} - g\cos\beta, \quad (4)$$

где  $M$  – масса шарика;  $V$  – скорость вылета;  $F_{cv}$  – сила сопротивления воздуха среды;  $F_{mp}$  – сила трения в потоке;  $g\cos\beta$  – гравитационная составляющая.

– В итоге микрошарик не достигал при встрече с поверхностью только 10 ... 12 м/с от требуемых 89 ... 100 м/с, так что не удавалось разрушить образовавшуюся на поверхности окисную пленку и продолжить процесс. Введение в поток микрошариков вместо воды газодидкостной среды и тока низкого напряжения позволило сразу скорость шариков повысить при контакте до 30 ... 40 м/с по нескольким причинам:

- снизилось 14 % трение в потоке из-за уменьшения его плотности до 30 %;
- газовая среда, обладающая определенной (не более 1 ... 1,15 % от  $\cos\beta g$ ) несущей способностью в потоке пара, тоже вложила свою лепту;
- и самое главное, шарик стал пробивать окисную пленку, которая частично стала рарушаться анодным низковольтным напрядением.

На первом этапе заряженные отрицательно гранулы более крупной фракции (рис. 1) воздействуют на микровыступы, удаляя их за счет механического съема. При этом создается наклеп в вершинах неровностей, что усиливает эффект избирательного анодного растворения и поверхность выравнивается.

Если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки, а граничными условиями – время действия анодного растворения при постоянной механической депассивации поверхности, то процесс съема неровностей с учетом известных выражений за единичный импульс контакта микрошариков в эффективном пятне распыла имеет вид

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = \Delta_0 - K_{эж} (\alpha/\gamma) \cdot \eta \cdot j_{cp} \cdot \tau_k, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – электрохимический эквивалент материала заготовки;  $\gamma$  – удельная плотность материала заготовки;  $j_{cp}$  – средняя за импульс плотность тока;  $\tau_k$  – длительность токопроводящего контакта при соударении;  $\eta$  – коэффициент вы-

хода по току;  $K_{зж}$  – концентрация жидкостной составляющей газожидкостной токопроводящей среды (по данным экспериментов 10 ... 20 %);

Ток ( $J$ ) в разряде как известно может достигать 100А, площадь контактного действия  $F$  на первом этапе составляет всего 0,05 ... 0,1 мм<sup>2</sup>, а диаметр пятна распыла достигает 30 мм. Тогда средняя плотность тока составляет  $J_{cp} = 0,3J/F$ . Здесь 20 ... 30% – плотность микрошариков в потоке. Длительность токопроводящего контакта рассчитывается по зависимости

$$t_k = K_{зж} r_{заг} \sqrt{\frac{\chi}{\mu \cdot f}}, \quad (6)$$

где  $r_{заг}$  – радиус зоны обработки в заготовке (до 15 мм);  $\mu_{П}$  – коэффициент Пуассона;  $f$  – частота следования соударений.

На втором этапе контакт гранулы составляет всего 0,02... 0,05 мм<sup>2</sup>. Расчет времени контакта по формуле (3.60) позволяет получить несколько приближенные результаты, а прямые измерения, приведенные дают  $t_k = 0,3 ... 0,6$  мкс.

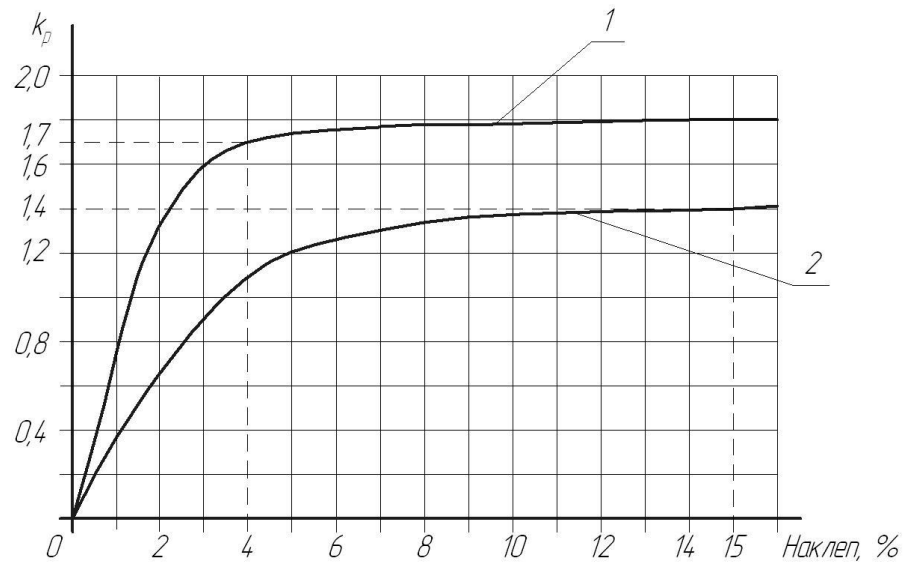
Скорость съема вершин микронеровностей зависит от анодного растворения при наклепе, которая может быть откорректирована полученными экспериментально коэффициентом, учитывающим анодное растворение,  $K_{ap} = 1,05 ... 1,15$  и коэффициентом механического удаления неровностей  $K_{my} = 1,1 ... 1,2$ . С учетом этого время выравнивания микрогеометрии в месте соударения составит

$$t_g \leq t_k N = \frac{K_{зж} \delta_{nl} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{\frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}}, \quad (6)$$

где  $\delta_{nl}$  – толщина окисной пленки в зоне контакта;  $N$  – количество соударений до полного насыщения поверхностного слоя пластическим деформированием.

Длительность обработки  $t_{yч}$  участка одного распыла с учетом значений  $F$  составит

$$t_{yч} = t_k \pi R^2 / F = \frac{K_{зж} \pi R^2 \delta_{nl} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{F \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}} \cdot N \quad (7)$$



1 – поверхность детали из конструкционной стали;  
2 – поверхность детали из легированной стали

Рисунок 1 – Зависимость ускорения анодного растворения в момент соударения микрошарика с деталью от степени наклепа

Динамическое давление микрошарика на поверхность, определяемое нами под углом соударения  $\alpha$  с поверхностью, как

$$\bar{P} = (3\sigma_m + \sigma^+ + \sigma_{хрпл})\alpha, \quad (8)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести материала;  $\sigma$  – растягивающие напряжения от предыдущих этапов обработки (70 ... 90 МПа);  $\sigma_{хрпл}$  – напряжение хрупкого разрушения окисных пленок после воздействия анодного растворения (до 40 ... 50 % от  $P_d$ ).

Съем материала за 1 импульс тока (в промежутке между соударениями) на последнем этапе незначителен и составляет доли мкм. Анодное воздействие в данном случае должно только удалять продукты деформационного воздействия и корректироваться  $U_0$  в пределах 2 ... 5 В.

Расчет технологических режимов комбинированной обработки отверстий:

1 Выбор диаметра микрошариков:

$$d_{ш} = 2R_{ср} = R_a^2 / h_y, \text{ мм}, \quad (9)$$

где  $R_{с\text{пр}}$  – приведенный к среднему диаметр радиуса отпечатка;  $R_a$  – радиуса отпечатка в горизонтальной плоскости;  $h_y$  – глубина отпечатка.

Полученный результат после опытной обработке на имитаторе и сравнения с аналитическими расчетами округляют до стандартного значения. Если расчетное значение превышает размеры шариков, разделенных на фракции в вибрационном сите, то их величину берут с учетом имеющихся типоразмеров шариков.

2 Из технической документации на деталь устанавливаем требования по степени наклепа и шероховатости отверстия.

3 Если шероховатость заготовки отвечает требованиям чертежа, то расчет режимов ведут по заданному наклепу.

4 Если требуется снизить шероховатость от  $A_2$  до  $R_{Zmin}$ , то припуск  $Z$  составит  $A_2$  до  $R_{Zmin}$  и минимальное время обработки элементного участка веду по 6 и 7.

Основные этапы проектирования технологического процесса комбинированной обработки микрошариками проходили по установленной НТД.

Предложенный метод имеет большие перспективы для нефтегазового оборудования, а также и для деталей пневматики и гидрооборудования транспортных машин различного назначения, имеющих глубокие точные отверстия большого диаметра, в том числе с покрытиями.

В последнее время проводятся исследования по изучению технологических возможностей способа для обработки поверхностей под покрытия и уплотнения самих покрытий. Известной проблемой для работоспособности гидравлического оборудования различного назначения является износ внутренних поверхностей пазов и каналов, контактирующих с рабочими водородонасыщенными средами. В ряде работ отмечено положительное влияние комбинированной упрочняющей обработки микрошариками до и после нанесения покрытия.

В итоге спроектирован и реализован процесс комбинированной обработки токопроводящими микрогранулами с интенсивным анодным растворением вершин микронеровностей поверхности. Впервые для этих целей в зоне обработки использована газожидкостная токопроводящая среда, создаваемая распыливанием жидкости до капельной фракции. Разработанные режимы позволяют управлять комбинированным процессом формообразования поверхностей глубоких полостей и отверстий с целью получения стабильных технологических

показателей поверхностей для их защиты в процессе эксплуатации.

Библиографический список

1 Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. – М. : «Машиностроение», 2004. – 287 с.